喀什河流域降水同位素特征及水汽来源分析

曾康康[1]， 杨余辉[1]， 胡义成[2]， 冯先成[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 新疆维吾尔自治区气象局，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：利用喀什河流域山区2017-07—2018-06大气降水同位素数据，以及流域山区温度、降水气象资料，分析了降水中$\delta^{18}O$、δD和氘盈余(d-excess)变化特征，讨论了$\delta^{18}O$与气温、降水量的关系，通过利用HYSPLI模型追踪分析流域山区大气降水的水汽来源。结果表明：(1) 流域内降水中$\delta^{18}O$季节变化明显，夏季$\delta^{18}O$同位素富集，冬季$\delta^{18}O$同位素贫化。(2) 不同降水类型中$\delta^{18}O$、δD的关系差异明显，夏季δD蒸发分馏大于$\delta^{18}O$、降雨大气降水线斜率及截距较小；冬季δD蒸发分馏明显减弱，降雪大气降水线斜率及截距较大。(3) 流域内大气降水同位素存在明显的温度效应，但是降水量效应不显著。(4) 流域内大气降水水汽主要来源于大西洋，受水汽远距离输送，途中加入较多二次蒸发水汽的影响，氘盈余值(d-excess)整体上偏大，但是2月氘盈余偏低，与受北极气团源地温度低、空气湿度大、水汽输送路径短影响有关。(5) 该流域夏季降水主要来源于西风环流和局地再循环水汽，冬季则受西风环流和北极气团共同影响，大西洋水汽形成的降水占研究区总降水量的68.6%，局地再循环水汽占17.1%，北冰洋水汽形成的降水占研究区总降水量的14.3%。

关键词：喀什河流域；大气降水；稳定同位素；水汽来源

氢氧稳定同位素是水体的重要组成部分，在自然界中保持稳定状态[1]。大气降水是陆地水循环的主要来源，对气候变化起到重要的指示作用[2]。降水中的氢氧稳定同位素作为水循环过程中的天然示踪剂，其变化过程主要和水汽源区的气候条件及水汽传输过程中的水汽循环相关，同时受到降水站点的气象条件（如温度和降水量）影响[3-4]。因此，利用降水中氢氧稳定同位素的组成可以更好地理解水循环过程[5]。

国外对同位素研究起步较早，国际原子能机构(IAEA)联合世界气象组织(WMO)，于1961年开始运行全球降水同位素监测网(Global Network for Isotopes in Precipitation，GNIP)。Craig[6]通过对降水中氢氧稳定同位素研究，发现了两者之间的线性关系($\delta D=8\delta^{18}O+10‰$)；Dansgaard[7]分析了降水稳定同位素的时空分布特征，并提出同位素效应和过量氘等基本概念。在国内，郑淑蕙等[8]首次提出了我国大气降水线方程：$\delta D=7.9\delta^{18}O+8.2$；章新平等[9-10]根据GNIP数据，绘制出我国$\delta^{18}O$分布图，并指出影响我国降水中$\delta^{18}O$的3条水汽路线。国内学者采用稳定同位素技术在青藏高原[11-12]，华北地区[13]，南方地区[14-15]的水循环过程进行了广泛的研究。

目前，稳定同位素技术已经广泛运用于西北地区的水文水资源研究中。刘小康等[16]基于GNIP乌鲁木齐站和和田站的相关数据，研究了天山山区氢氧同位素的年际变化和水汽来源，探讨了西风带对新疆降水氢氧稳定同位素的影响；Wang等[17]分析了云下蒸发对新疆夏季降水同位素的影响；Kong等[18]对乌鲁木齐河流域的站点氢氧同位素和氘盈余变化规律进行分析，探讨了乌鲁木齐河的水汽再循环比例；蒋新华等[19]分析了伊犁河谷大气降水同位素特征并计算了伊犁河谷地区夏季云下蒸发的占比。同时，全球降水同位素监测网(GNIP)在新疆仅有乌鲁木齐和和田站点，覆盖范围有限，喀什河流域山区距离乌鲁木齐和和田2个站点较远，缺乏全年稳定同位素及水汽来源方面的研究。作为新疆

收稿日期：2020-07-06； **修订日期：**2021-05-08
基金项目：国家自然科学基金项目(41761004)
作者简介：曾康康(1989-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区水资源研究. E-mail: 1046643418@qq.com
通讯作者：杨余辉. E-mail: 375885253@qq.com

典型的山区河流，通过对其降水中氢氧同位素特征与水汽来源关系进行分析，对于深刻理解天山西部水汽循环过程、区域降水格局以及降水的成因具有重要的理论意义，而且对认识大气中水汽的形成和变化机制及未来气候变化预测等都有重要的实际价值。

1 研究区概况

喀什河是伊犁河上游第二大支流，源于天山和依连哈比尔尕山交界高山冰川地带，向西流至伊宁县墩麻扎附近雅玛渡与巩乃斯河汇合。喀什河流域（图1）地处亚欧大陆腹地，地理坐标为43°25′~44°25′N，81°50′~84°45′E，属温带大陆性气候。流域总面积9541 km²，河长304 km，流域海拔在800~4600 m之间[20]。河源海拔3600 m左右，地势东高西低。河道顺直，河型呈羽毛形，支流短小而广布，较大支流有寨口河、包尔包斯河等[21]。

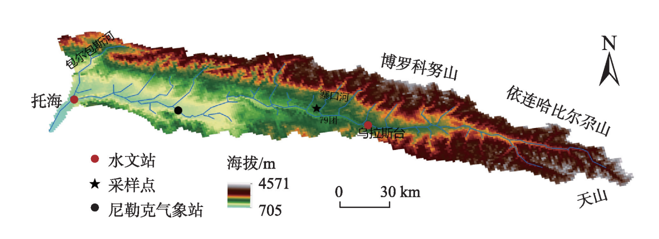


图1　喀什河流域山区降水采样点及水文、气象观测站点分布示意图

Fig. 1　Distribution of precipitation sampling piont and hydrometeorological observation stations in mountainous areas of Kashi River Basin

2 材料与方法

2017-07—2018-06在伊犁喀什河流域的尼勒克县79团共采集58个降水样品，其中降雨样品35个，降雪样品23个。采样点地理坐标为43°45′N，82°16′E，海拔高度为1502 m。每次降雨开始，在室外开阔的空地上，先用聚乙烯塑料小桶收集降雨，记录降水开始和结束时间，等降雨结束后立刻用50 mL塑料采样瓶装样，盖好瓶盖后，在室内用蜡在瓶口密封再用胶带缠好，之后放进小冰箱里面低温（4 ℃）保存，以防止蒸发。降雪的采集过程与降雨类似，先收集好密封然后放在室内等其自然融化，进行同样处理。为了防止降水样本被污染，所有采样设备在采样前保持干燥。相对湿度、降水等气象数据来自于新疆维吾尔自治区气象信息中心尼勒克气象站，该站位于尼勒克县城北部，采样点以西约60 km。

水样的δD和$\delta^{18}O$值采用Los Gatos Research Inc生产的液态水稳定同位素分析仪[DLT-100]进行测量。δD和$\delta^{18}O$的精度分别达到0.5‰和0.2‰。测量结果用维也纳标准平均海洋水（VSMOM）的千分差进行表示：

$$\delta^{18}O = \left(R_{sample}/R_{vsmow} - 1\right) \times 1000‰ \qquad (1)$$

式中：R_{sample}和R_{vsmow}分别代表降水和维尔纳标准平均海水的$^{18}O/^{16}O$和D/H值。

降水中氢氧稳定同位素比率的加权平均值为：

$$\delta = \sum P_i \delta_i \Big/ \sum P_i \qquad (2)$$

式中：δ为月加权平均值；P_i为单次降水量；δ_i为其相应的稳定同位素值。

HYSPLIT（hybrid single particle lagrangian intergrated trajectory），即混合单粒子拉格朗日综合轨迹模型，是一种计算和分析大气污染物输送，扩散轨迹的专业气象模型[22]。本研究利用美国国家环境预测中心（national centers for environmental prediction, NCEP）和国家大气研究中心（national centers for atmospheric research, NCAR）的全球日数据再分析资料（2.5°×2.5°），垂直共17层，结合HYSPLIT模型后向轨迹法对水汽来源轨迹进行模拟；以伊犁喀什河流域的尼勒克县79团为轨迹终点，地理坐标为43°45′N，82°16′E，海拔高度1513 m，初始高度为2000 m，分3层，即：2000 m、3000 m、4000 m，运行时间120 h[23]。对2017-07—2018-06降水事件进行分析，研究区整个观测期氘盈余变化，揭示喀什河流域降水水汽来源。根据HYSPLIT模拟的水汽来源轨迹估算不同水汽来源对研究区气水的贡献比例。统计每次降水事件发生时的降水量大小及水汽来源，水汽来源分为大西洋、北冰洋和局地水汽，计算大西洋、北冰洋和局地蒸发水汽形成的降水各自占全年降水量的比例。

3 结果分析

3.1 伊犁喀什河流域降水氢氧同位素的季节变化

由图2和表1可知，2017-07—2018-06，降水中$\delta^{18}O$和δD的变化幅度较大，其中$\delta^{18}O$值变化范围为

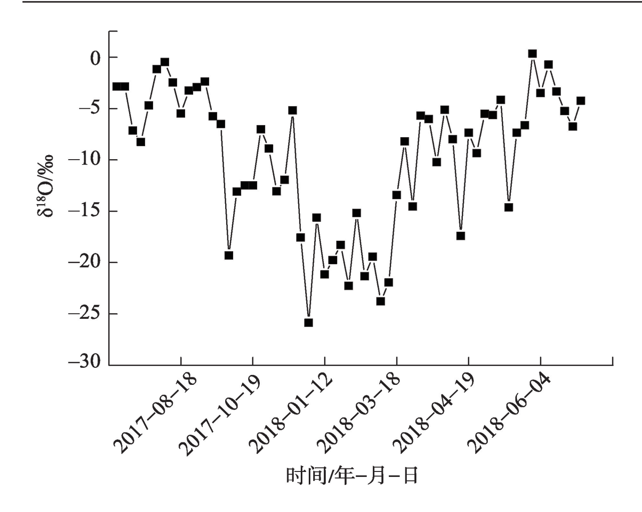


图2　研究区次降水中δ¹⁸O随时间变化趋势

Fig. 2　Temporal variation trend of δ¹⁸O in precipitation in the study area

−25.8‰~0.35‰，加权平均值为−9.61‰；δD值变化范围为−194.17‰~9.91‰，加权平均值为−70.32‰。区域内降水δ¹⁸O和δD值季节变化显著，夏季富集冬季贫化。从月降水件事来看(表1)，δ¹⁸O最大值出现在2017年7月，最小值出现在2017年12月，δD最大值出现在2017年7月，最小值出现在2018年2月。原因是喀什河流域地处天山西部，这一区域降水中重同位素夏季富集，冬季贫化的季节特点被广泛认为反映了西风水汽的主导性[24]。从次降水事件来看，δ¹⁸O最大值为0.36‰，也是唯一的1次正值，出现在2018年6月8日，该次降水量为1 mm，日均温16.8 ℃，此次降水发生时，气温较高，降水量小，雨滴在下落过程中由于蒸发产生重同位素富集，使得降水中δ¹⁸O同位素值更高，甚至出现正值。前人基于GNIP数据发现乌鲁木齐河流域氢氧稳定变化特征也是夏季富集，冬季贫化，和喀什河流域相似，都是对西北地区典型大陆性气候年周期变化规律的反映[16,25]。

通过与东南沿海季风地区降水δ¹⁸O变化情况比较发现，两者的季节变化特征相反。这是因为两者由于纬度、海陆位置差异导致不同季节受不同大气环流的控制，尤其与该地区受季风影响大小相关[26]。一般在中高纬度地区，尤其是高纬度内陆区，由于长期受大陆性气团的影响，局地蒸发对水汽中的同位素影响大，冬夏温度差异大,受其影响，δ¹⁸O值表现出夏高冬低的特征。在中低纬度的沿海区，则明显受季风气候的影响。夏季，来自低纬度海洋(太平洋和印度洋)的气团湿度大，δ¹⁸O相对较低；冬季由西风环流携带的空气具有大陆性气团的特性，湿度低、蒸发强、δ¹⁸O值相对较高[27]。

3.2　局地降水线特征

喀什河流域大气降水中的δ¹⁸O和δD之间存在显著的线性关系(图3)，回归得到研究区局地大气降水线方程为(local meteoric water line, LMWL):

$$\delta D = 8.2\delta^{18}O + 16.8‰ \quad (R^2 = 0.98)$$

喀什河流域局地大气降水线斜率和截距均高于全球大气降水线和下游伊犁河局地大气降水线(δD=7.9δ¹⁸O+10.3‰)，说明研究区受局地再循环水

表1　研究区氢氧同位素、氘盈余、气温与降水月平均值

Tab. 1　Monthly mean values of isotope, deuterium surplus, temperature and precipitation in the study area

日期/年-月	平均值				
	δO/‰	δ¹⁸O/‰	氘盈余/‰	气温/℃	降水量/mm
2017-07	−7.22	−3.09	17.5	20.9	30.0
2017-08	−9.66	−3.49	18.26	17.5	37.4
2017-09	−96.43	−14.12	16.53	11.6	12.1
2017-10	−81.61	−12.62	19.35	4.46	17.3
2017-11	−66.32	−11.09	22.4	3.42	41.3
2017-12	−147.56	−20.76	18.52	2.18	19.7
2018-01	−148.84	−19.95	10.76	−5.9	12.5
2018-02	−172.83	−21.90	2.37	0.37	11.3
2018-03	−117.01	−16.09	11.72	4.71	19.7
2018-04	−55.88	−8.63	13.16	7.42	13.6
2018-05	−73.37	−11.01	14.71	12.23	17.7
2018-06	−16.18	−3.77	13.98	18.04	25.1

注：气温平均值是采样日气温的平均。

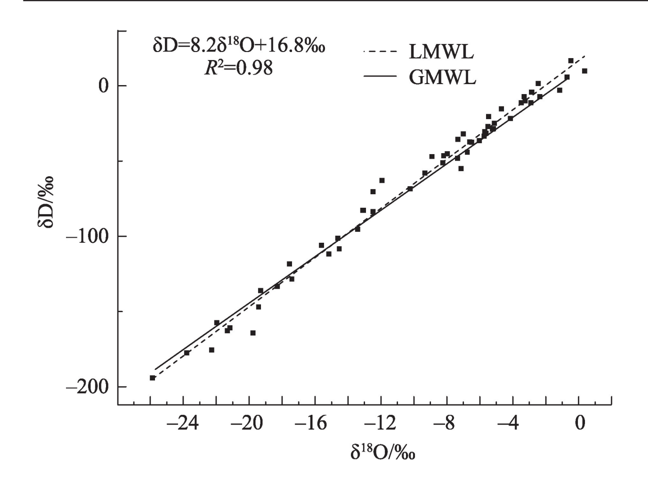


图3　研究区局地大气降水线

Fig. 3　Local meteoric water line map of study area

汽影响大，云下蒸发作用小的特点。也体现了西北干旱区山区河流典型特征，即河流下游低海拔地区局地大气降水线斜率和截距普遍偏低，上游高海拔地区局地大气降水线斜率和截距普遍偏高[28]。在亚洲中部干旱区，地形和下垫面是影响局地大气降水线斜率和截距的重要因素，低海拔绝大部分区域被沙漠戈壁覆盖，再循环水汽的绝对量比较有限，加上气温高，云下二次蒸发影响大，大气降水线斜率和截距较低。但在高海拔地区，绿洲和植被覆盖茂盛的草原或森林，受局地再循环水汽影响大，同时较多的降水量减弱的云下二次蒸发，使得大气降水线斜率和截距较高。喀什河中上游植被丰富，乌拉斯台水电站以上以高山草甸为主，草地面积占研究区总面积的57.78%，植物蒸腾水汽旺盛，使得该地区水汽再循环作用较大，局地大气降水线斜率和截距偏高[15]。

通过比较不同降水类型的大气降水线方程（图4）可以发现2个特点：(1) 降雪大气降水线和降雨相比，斜率、截距值明显偏高，这是因为降雪主要发生在冬季，气温低，云下蒸发弱，斜率和截距值高；而降雨主要发生在夏季，气温高，存在一定的云下蒸发作用，斜率、截距值低，斜率值略低于全球大气降水线，说明其云下二次蒸发作用强。(2) 无论是降雪还是降雨，其局地大气降水线的截距均较高，则说明了受局地再循环水汽影响大。

3.3　温度效应和降水量效应

3.3.1　温度效应　研究区月均温及$\delta^{18}O$月加权平均值分别做线性回归，方程为：

$$\delta^{18}O = 0.73t - 18.21 \quad (R^2 = 0.66)$$

由图5可以看出，研究区大气降水中的$\delta^{18}O$月均温呈显著的正相关，月均温相关性较好（R^2=0.66），随着温度升高，$\delta^{18}O$逐渐富集，降水中的$\delta^{18}O$受温度影响比较明显。喀什河流域山区地处我国西北内陆，中高纬度，夏季云下蒸发强，对^{16}O和D等轻同位素分馏作用明显，$\delta^{18}O$富集；冬季温度低，云下蒸发弱，且二次蒸发水汽在上升过程中，绝热膨胀作用明显，综合作用下导致$\delta^{18}O$贫化。伊宁、尼勒克和新源3个站点全年$\delta^{18}O$与温度呈显著正相关关系，相关系数分别0.92、0.67、0.77，均大于采样点的相关系数0.66，说明随着在伊犁河谷地区随着海拔升高，温度效应减弱。

由图6可知，$\delta^{18}O$、d-excess和气温之间的关系从左至右可以分为三部分：第一部分数据反映冬春季情况，气温在0 ℃以下，云下蒸发和水汽再循环作用不明显，同位素主要受分馏作用的影响。这一时期，温度与$\delta^{18}O$正相关性高，随着温度上升，$\delta^{18}O$富集，温度效应明显。第二部分数据对应的温度在0~

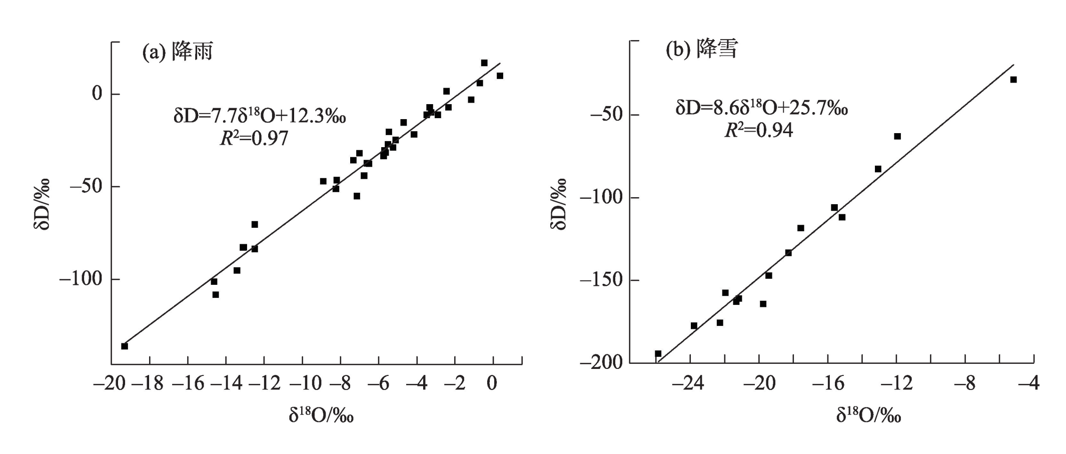


图4　研究区不同降水类型的大气降水线

Fig. 4　Local meteoric water lines of different precipitation types in the study area

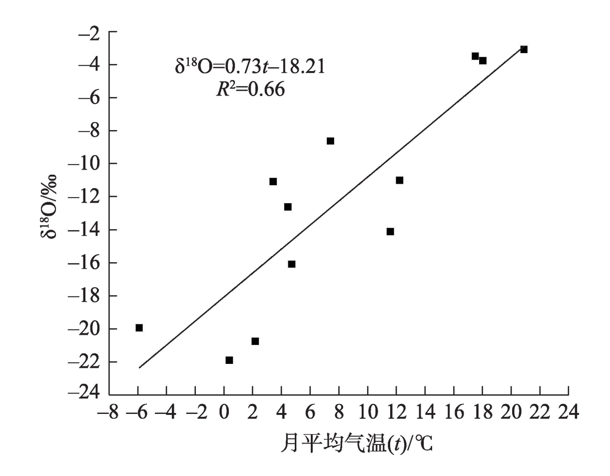


图5 研究区降水δ18O与气温的关系

Fig. 5 Relationship between precipitation δ18O and temperature in the study aera

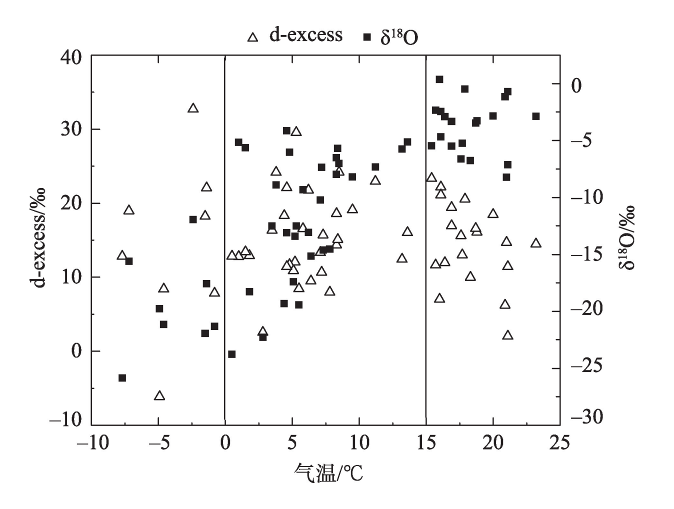


图6 研究区δ18O、氘盈余与气温的关系

Fig. 6 Relationship between precipitation δ18O, d-excess and temperature in the study aera

15 ℃之间,随着气温升高,δ18O无明显变化,δ18O和d-excess分布无规律可循。云下蒸发引起的δ18O富集和水汽再循环形成的贫化的同位素中和,温度效应不明显。第三部分数据对应的温度在15~25 ℃之间,主要是夏秋季降水事件,具有较高δ18O和较低d-excess。这一时期内,随着气温升高,δ18O富集,温度效应显著。d-excess贫化,说明云下蒸发作用加强,水汽在云下蒸发作用下,同位素分馏作用明显,δ18O富集,表明云下蒸发超过了水汽再循环的贫化效应[29]。

3.3.2 降水量效应 喀什河流域δ18O与降水量(p)的关系通过线性回归表示,方程为:

$$\delta^{18}O = 0.19p - 16.42 \quad (R^2 = 0.01)$$

由图7可以看出,喀什河流域降水同位素的降水量相关性不显著(R^2=0.01)。产生这种现象的原因可能与当地气候条件相关,喀什河流域处于大陆内部,为温带大陆性气候,区域降水主要集中在夏秋季,夏秋季节温度高,温度效应显著,同位素富集,温度效应会在一定程度上掩盖降水量效应。通常来说,在中高纬度的陆地区降水中δ18O的季节变化受温度效应控制,在沿海岛屿及热带地区受降水量效应控制[30]。在我国,温度效应大致发生在34°~36°以北的地区,沿海地区和受季风影响的地区,降水中稳定同位素比率与降水量存在显著的负相关关系,降水量效应显著[31-32]。

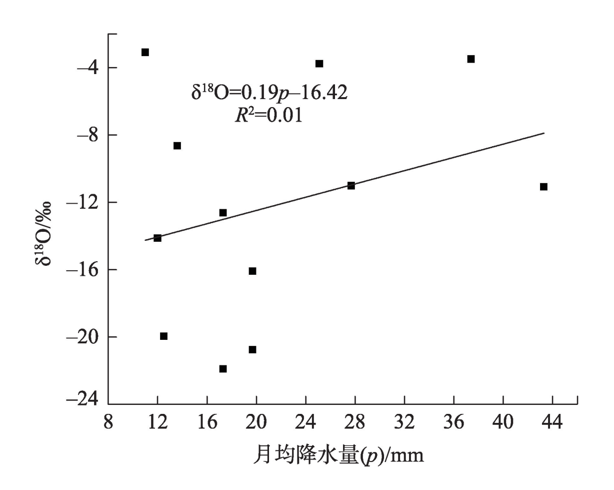


图7 研究区大气降水中δ18O与降水量的关系

Fig. 7 Relationship between δ18O and precipitation in atmospheric precipitation in the study area

表2可以看出,流域内秋季降水量效应比较显著,其次是冬季,春季和夏季则无降水量效应。原因是秋季降水比较丰富,仅次于夏季,同时气温又比较低,不仅远低于夏季,也低于春季,温度效应对降水量效应影响小,因而存在一定的降水量效应。夏季虽然降水量最多,但同时温度比较高,温度效应掩盖了降水量效应,因而夏季并无降水量效应。黑河流域[33]、乌鲁木齐河[34]和托来河[35]流域也存在类似情况,这也说明了西北干旱区在年尺度上降水量效应不明显,但是某些季节的降水量效应不可忽视。

3.4 研究区氘盈余的变化特征

由图8可知,喀什河流域山区d-excess变化范围为−6.13‰~32.71‰,平均值为15.17‰,并且在58个样本中,有49个样本高于全球平均值10‰。大气降

表2 研究区不同季节$\delta^{18}O$与降水量的关系

Tab. 2 The relationship between $\delta^{18}O$ and precipitation in different seasons in the study area

季节	$\delta^{18}O$和降水量拟合方程	降水占全年比例/%	平均气温/℃
春季	$\delta^{18}O=-0.38p-11.03(R^2=0.01)$	18.01	7.2
夏季	$\delta^{18}O=-0.06p-3.49(R^2=0.01)$	39.94	18.5
秋季	$\delta^{18}O=-0.67p-5.19(R^2=0.33)$	29.56	6.8
冬季	$\delta^{18}O=-0.48p-18.50(R^2=0.12)$	12.49	−3.0

水中氘盈余变化主要受水汽源地和输送路径影响，也受局地气象因素的影响[36]。Aizen等[37–38]对阿尔泰山Belukha冰川雪芯记录的研究显示，具有不同水汽来源的降水的氘盈余存在明显区别，源自北冰洋的水汽形成的降水具有偏低的d-excess(<7.8‰)，源自大西洋的水汽形成的降水的过量氘的范围为7‰~12‰，而陆源水汽形成的降水的d-excess均大于12‰。研究区地处西天山腹地，西风带的迎风坡向，常年受西风影响，水汽远距离输送，加上流域内植被丰富，植被蒸腾水汽较多，使高海拔山区的更多地受到局地再循环水汽的影响，从而使全年d-excess值整体偏高。在月尺度上(表1)，研究区d-excess值差异显著且每个月均值偏高，除2月外，其他月份的d-excess值均大于10，其中10月和11月d-excess加权平均值分别为19.35‰和22.4‰；2月d-excess加权平均值仅为2.37‰，明显低于其他月份，2月仅发生3次降水事件，分别为2月18日、2月23日和2月28日，对应的d-excess值为−6.13‰、12.93‰和2.54‰，其中2次小于7.8‰，说明2月水汽主要来源于北冰洋。夏秋季降水主要来源于西风带输送的大西洋水汽，远距离输送空气湿度低，并且研究

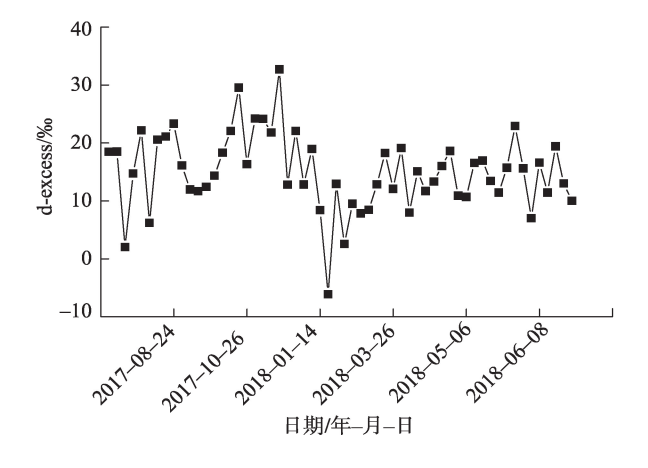


图8 研究区氘盈余时间变化

Fig. 8 Temporal variation of deuterium surplus in the study area

区海拔较高，夏季云下蒸发弱，局地水汽再循环作用强，因此d-excess值较高。冬春季受北极气团影响，大气降水的水汽来源于北冰洋，d-excess低。秋季d-excess值高于夏季则是因为夏季气温较高，云下二次蒸发作用明显，对大气降水中d-excess值起到了贫化作用。

3.5 水汽来源的关系对降水中氢氧稳定同位素和氘盈余的影响

降水中$\delta^{18}O$和d-excess变化不仅受局地气象要素的影响，也与大气降水的水汽来源与输送过程关系密切。根据HYSPLIT后向轨迹模型对12个月水汽来源进行聚类分析，由于大多降水事件的轨迹图非常相似，选取典型的降水事件(每月单次最大降水量事件，图9)并结合表1进行分析。可以看出，研究区夏季水汽主要来源于大西洋和地中海，经由西风带输送至亚欧大陆内部，输送途中近源海洋水汽和局地蒸发水汽不断加入，$\delta^{18}O$偏高，其中6—8月的$\delta^{18}O$加权平均值分别为−3.77‰、−3.09‰和−3.49‰，均高于其他季节；9—11月以后，来自大西洋的水汽开始减少，加上气温降低，沿途局地蒸发水汽加入的水汽减少，$\delta^{18}O$值逐渐降低，9—11月$\delta^{18}O$加权平均值为−14.12‰、−12.62‰和−11.09‰，低于夏季而高于冬季；冬季则受西风带和极地气团共同影响，水汽来源偏北，输送距离短，沿途局地蒸发弱，$\delta^{18}O$偏低，其中12—2月降水中事件中$\delta^{18}O$加权平均值分别为−20.76‰、−19.95‰和−21.90‰，均低于其他季节。春季水汽来源地南移，来自大西洋水汽增加，$\delta^{18}O$值逐渐升高，和秋季一样，低于夏季而高于冬季。d-excess月加权平均值变化趋势与$\delta^{18}O$不一致，秋季高，冬季低，最高值出现在11月，最低是2月。其中11月水汽来源于中亚内陆地区，水汽源地湿度低，加上局地蒸发水汽影响，d-excess值达到最高。

根据HYSPLIT模拟的水汽来源轨迹估算不同水汽来源对研究区气水的贡献比例。本研究把新

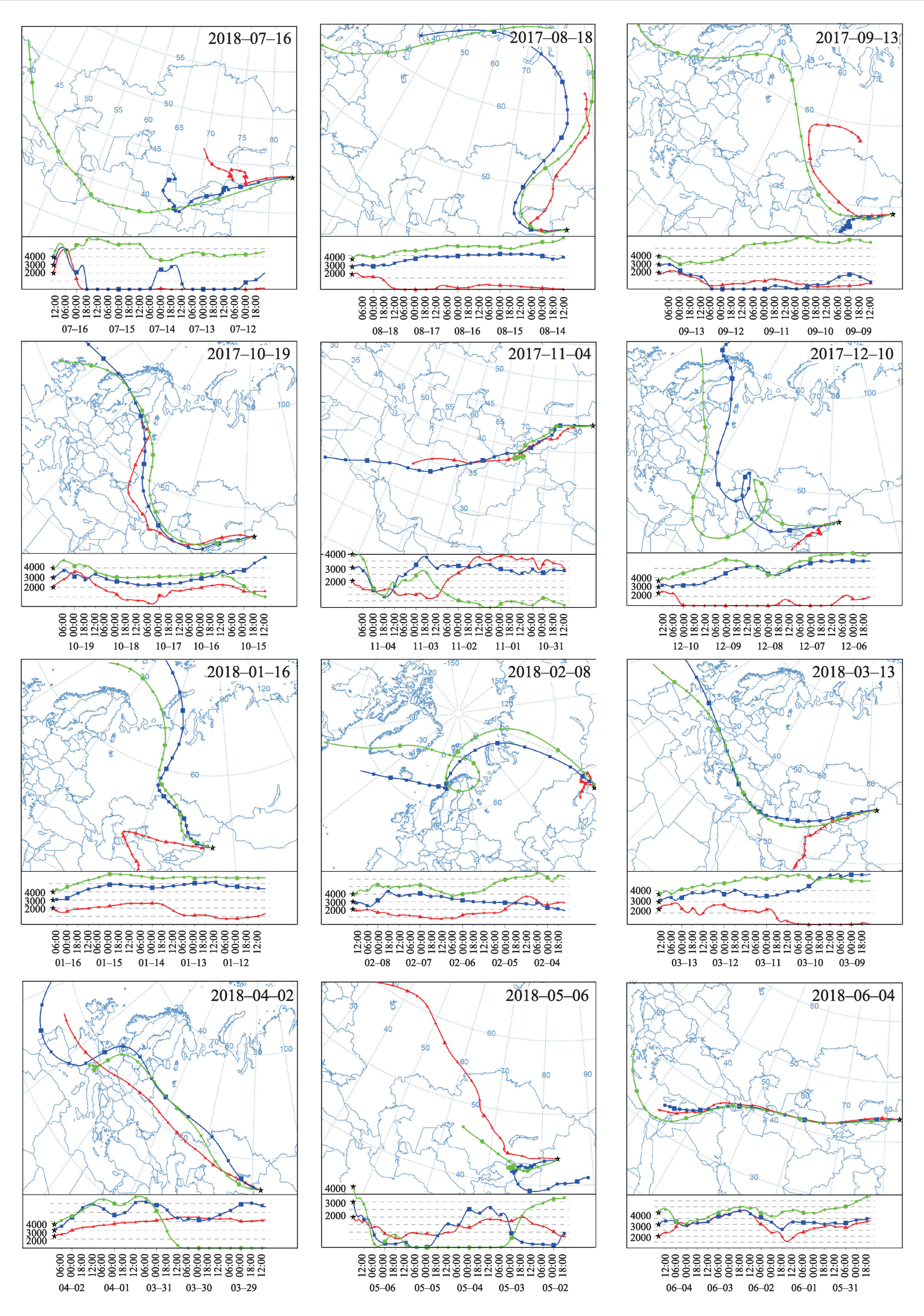


图9 HYSPLIT模型输出研究区每月降水水汽来源

Fig. 9 Track of monthly precipitation water vapor source in the output study area of hysplit model

疆和中亚水汽划分为局地蒸发水汽,西伯利亚及北极地区水汽划分为北冰洋水汽,里海以西的远距离水汽划分为大西洋水汽。由表3可知,2017–07—2018–06研究区降水量为256.8 mm,其中来自于大西洋水汽形成的降水为212.3 mm,占比为82.6%,来自北冰洋的水汽形成的降水为44.5 mm,占比为

表3 不同水汽来源所形成的降水量及其占总降水量的百分比

Tab. 3 Rianfall from different water vapor sources and its percentage to total precipitation

水汽来源地	降水事件数	降水量/mm	占总降水比值/%
大西洋	32	176.2	68.6
北冰洋	12	36.8	14.3
局地水汽	14	43.8	17.1
合计	58	256.8	100

17.4%，主要集中在冬季。利用后向轨迹的方法有一定的局限性，无法精确估算局地蒸发对降水量的影响。因为海洋性汽输送过程中可能与局地蒸发的水汽相结合，而在轨迹模拟中，这一部分水汽来源成为了海洋水汽轨迹中的一部分，从而一定程度上高估了海洋水汽对研究区降水量的贡献[28]。

4 结 论

（1）喀什河流域山区降水中$\delta^{18}O$的波动范围为−25.87‰~0.35‰，季节变化明显，夏季温度高，蒸发分馏作用强，$\delta^{18}O$同位素富集；冬季温度低，蒸发分馏作用弱，$\delta^{18}O$同位素贫化。这与东天山乌鲁木齐河流域氢氧稳定变化特征相一致，是对西北地区典型大陆性气候年周期变化规律的反映。

（2）研究区的大气降水线方程为（LMWL）：$\delta D=8.2\delta^{18}O+16.7‰$（$R^2=0.98$），其斜率和截距均大于全球大气降水线。该降水线高斜率和高截距反映了西北干旱区高海拔地区主要受局地再循环水汽的影响。

（3）研究区大气降水同位素存在显著的温度效应：$\delta^{18}O=0.73t-18.21$（$R^2=0.66$），降水量效应在年内的尺度上降水量效应不显著，在季节尺度上，秋季降水丰富，气温低，温度效应对降水量效应掩盖不明显，因此秋季有一定的降水量效应。

（4）流域内大气降水氘盈余值偏正，分布范围在−6.17‰~32.7‰之间，平均值为15.1‰，大于全球降水氘盈余的平均值10‰。从全年尺度上看，氘盈余整体上偏大，说明其受到来自大西洋水汽和局地再循环水汽影响大。从季节上看，夏秋季降水来自于大西洋，氘盈余高；冬春季降水来自北冰洋，氘盈余值低。

（5）根据HYSPLIT模拟水汽来源发现研究区夏秋季节水汽主要来源于大西洋和局地蒸发水汽，形成的降水占总降水量的68.6%和17.1%，冬春季节水汽主要来自于北冰洋,，水汽形成的降水占总降水量的14.3%，水汽来源季节差异明显。2月氘盈余值偏低，是受北极气团影响大的原因。

参考文献（References）：

[1] 贺强, 孙从建, 吴丽娜, 等. 基于GNIP的黄土高原区大气降水同位素特征研究[J]. 水文, 2018, 38(1): 58−66. [He Qiang, Sun Congjian, Wu Lina, et al. Isotopic characteristics of atmospheric precipitation over the Loess Plateau based on GNIP[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(1): 58−66.]

[2] Tang Yu, Song Xianfang, Zhang Yinhua, et al. Using stable isotopes to understand seasonal and interannual dynamics in moisture sources and atmospheric circulation in precipitation[J]. Hydrological Processes, 2017, 31: 4682−4692.

[3] Jia Wenxiong , Xu Xiuting, Yuan Ruifeng F, et al. Variation characteristics of stable isotopes in precipitation and the environmental factors that influence them in the Shiyang River Basin of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78: 306.

[4] Pang Zhonghe, Kong Yanglong, Froehlich K, et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region[J]. Tells B, 2011, 63: 352−359.

[5] Tian Lide, Yao Tandong, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112 (D10) 10112.

[6] Craig H. Isotopic variations in meteoric water [J]. Science, 1961, 133: 1702−1703.

[7] Dansgaard W. Stable isotopes in precipition[J]. Tellus, 1964, 16 (4): 436−468.

[8] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 34(13): 801−806. [Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Hydrogen and oxygen isotopes of precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 34(13): 801−806.]

[9] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中$\delta^{18}O$的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 356− 364. [Zhang Xinping, Yao Tiandong. Distribution features of $\delta^{18}O$ in precipitation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 356−364.]

[10] 章新平, 刘晶淼, 田立德, 等. 亚洲降水中$\delta^{18}O$沿不同水汽输送路径的变化[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 699−708. [Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Tian Lide, et al. Variation of $\delta^{18}O$ in precipitation along vapor transport paths over Asian[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 699−708.]

[11] Yang Xiaoxin, Xu Baiqin, Yang Wei, et al. Study of altitudinal lapse rates of $\delta^{18}O$ in precipitation/river water with seasons on the southeast Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54: 2742−2750.

[12] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 60−66. [Zhu Jianjia, Chen

Hui, Gong Guoli, et al. Hydrogen and oxygen compositions of precipitation and its watervapor sources in eastern Qaidam basin[J] . Journal of Natural Resources, 2015, 36(8): 60-66.]

[13] 王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展 2009, 20(4): 495-501. [Wang Shiqin, Song Xianfang, Xiao Guoqiang, et al. Appliance of oxygen and hydrogen and oxygen isotopes in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of north China plain[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 495-501.]

[14] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 等. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1094-1103. [Zhang Guiling, Jiao Yuanmei, He Liping, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Southwest China: Progress and prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1094-1103.]

[15] 黄一民, 章新平, 唐方雨, 等. 长沙大气降水中稳定同位素变化及过量氘指示水汽来源[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1945-1954. [Huang Yiming, Zhang Xinping, Tang Fangyu, et al. Variation of stable isotopes in precipitation and excess deuterium indicating water vapor source in Changsha[J]. Journal of Natural Resource 2013, 28(11): 1945-1954.]

[16] 刘小康, 饶志国, 张肖剑, 等. 天山地区大气降水氧同位素的影响因素及其对西风环流的指示意义[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 97-109. [Liu Xiaokang, Rao Zhiguo, Zhang Xiaojian, et al. The influencing factors of oxygen isotopes in atmospheric precipitation in tianshan area and their indicative significance to westerly circulation[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 97-109.]

[17] Wang Shenjie, Zhang Mingjun, Chen Felin, et al. Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid Central Asia[J]. Journal of Geographical Science, 2015, 25(7): 771-783.

[18] Kong Yanglong, Pang Zhonghe, Klaus froehlich. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess [J]. Tellus B, 2013, 65: 19251.

[19] 蒋新华, 苏晨, 程中双, 等. 伊犁河谷大气降水同位素特征及环境意义[J]. 新疆地质, 2019, 37(3): 378-381. [Jiang Xinhua, Su Chen, Cheng Zhongshuang, et al. Stable isotopic characteristic and environmental signficance of Ili River valley precipitation[J]. Xinjiang Geology, 2019, 37(3): 378-381.]

[20] 王姣妍. 气候变化对天山西部哈什河径流变化过程的影响分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1153-1160. [Wang Jiaoyan. Impacts of climate change on runoff process of Khash River in Western Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1153-1160.]

[21] 张亚璇, 雷晓云, 姜泉泉, 等. 哈什河径流趋势预测及周期分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 18-22, 56. [Zhang Yaxuan, Lei Xiaoyun, Jiang Quanquan, et al. Trend and period analysis of long-term run off in Khasu river[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 18-22, 56.]

[22] Draxler R, Hess G D. An overview HYSPLIT-4 modeling system for trajectories dispresion and deposition[J]. Australian Meterorological Magazine, 1998, 47: 295-308.

[23] 张亚宁, 张明军, 王圣杰, 等. 基于比湿订正拉格朗日模型的新疆短时强降水的水汽来源[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 173-186. [Zhang Yaning, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Moisture source for short-time heavy rainfall in Xinjiang based on specific humidity-adjusted Lagrangian model[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 173-186.]

[24] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 139-145. [Hou Dianjiong, Qin Xiang, Wu Jinkui, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Urumqi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 139-145.]

[25] 王圣杰, 张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J]. 第四纪研究, 2017, 37(5): 1119-1130. [Wang Shengjie, Zhang Mingjun. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of stable isotope of precipitation across the Chinese Tianshan mountain[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(5): 1119-1130.]

[26] Liu Jianrong, Song Xianfang, Sun Xiaoming, et al. Isotopic composition of precipitation over arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin[J]. Geographical Sciences, 2009, 19: 164-174.

[27]] 隋明浈, 高德强, 徐庆, 等. 江苏高邮大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1823-1832. [Sui Mingzhen, Gao Deqaing, Xu Qing, et al. Characteristics of hydrogen and oxygene isotopes in precipitation and moisture sources in Gaoyou, Jiangsu Province, China[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 30(6): 1823-1832.]

[28] 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 等. 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. 环境科学 2019, 40(6): 2615-2623. [Wang Shaoyong, Wang Qiaoli, Wu Jinkui, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation and moisture sources in the headwater of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2615-2623.]

[29] 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义[J]. 环境科学 2019, 40(5): 2122-2131. [Yuan Ruifeng, Li Zongxin , Cai Yuqin, et al. Space-time characteristics and environmental of stable isotopes in precipitation at an arid inland river basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2122-2131.]

[30] 桂娟, 李宗省, 冯起, 等. 古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 149-156 [Gui Juan, Li Zongsheng, Feng Qi, et al. Space-time characteristics and environmental of the stable isotopes in precipitation in the Gulang River basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 149-156.]

[31] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 基于温度作为辅助变量的中国降水$\delta^{18}O$空间分布特征[J]. 地理科学进展, 2011, 30 (11): 1387-1394. [Li Yaju, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Spatial dis-

tribution of δ18O in China's precipitation based on a secondary variable of temperature[J]. Progress in Geographical Science, 2011, 30 (11): 1387−1394.]

[32] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 624−633. [Li Yaju, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Preogress of the research of stable isotope inprecipitation in China: A Review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 624−633.]

[33] 冯芳, 李忠勤, 金爽, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水δ18O和δD特征及水汽来源分析[J]. 水科学进展 2013, 24(5): 634−641. [Feng Fang, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Characteristics of δ18O and δD in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River basin, Eastern Tianshan[J]. Advances in Water Sciences, 2013, 24(5): 634−641.]

[34] 王宁练, 张世彪, 蒲健辰, 等. 黑河上游河水中δ18O季节变化特征及其影响因素研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 914−920. [Wang Ninglian, Zhang Shibiao, Pu Jianchen, et al. Seansonal variation of δ18O in river in the upper reaches of Heihe river basin and its influence factors[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 914−920.]

[35] 李永格, 李宗省, 冯起, 等. 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 159−170. [Li Yongge, Li Zongsheng, Feng Qi, et al. Environmental significance of the stable isotopes in precipitation at different altitudes in the Tuolai Riverb Basin[J]. Environmental Science, 2019, 39(6): 159−170.]

[36] 孔彦龙. 基于氘盈余的内陆干旱区水汽再循环研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. [Kong Yanlong. Quantifying Recycled Moidture Fraction in Precipitation of An Arid Region Using Deuterium Excess[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013.]

[37] Aizen V B, Aizen E M, Joswiak D R, et al. Climatic and atmospheric circulation pattern variability from ice-core isotope /geochemistry records (Altai, Tien Shan and Tibet)[J]. Annals of Glaciology, 2006, 4(3): 49−60.

[38] 侯浩, 侯书贵, 庞洪喜. 阿尔泰山蒙赫海尔汗冰川不同水体稳定同位素空间分布特征及水汽来源[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1271−1279. [Hou Hao, Hou Shugui, Pang Hongxi. Stable isotopes in different water samples on the Monh Hayrhan Glacier, Altay Mountains: Spatial distribution features and vapor sources[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1271−1279.]

Isotopic characteristics and water vapor sources of precipitation in the Kashi River Basin

ZENG Kangkang[1], YANG Yuhui[1], HU Yicheng[2], FENG Xiancheng[1]

(1. Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Areas of Xinjiang, College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. Meteorological Information Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Using the precipitation isotopic data from July 2017 to June 2018 in the mountainous area of the Kashi River Basin, in addition to the meteorological data of and precipitation in this mountainous area, we have analyzed and discussed the seasonal variation characteristics of $\delta^{18}O$, δD, and d-excess in precipitation, along with the relationship between $\delta^{18}O$ and temperature and precipitation. We used a hysplit model to trace and analyze the water vapor source of atmospheric precipitation in this mountainous area. Our findings reveal that: (1) The hydrogen and oxygen isotopes in the precipitation of the Kashi River Basin fluctuate over a wide range, with obvious seasonal variation; i. e. , enrichment in summer and depletion in winter. This is due to high temperatures and a strong evaporation fractionation in summer and low temperatures and a weak evaporation fractionation in winter; (2) The intercept and slope of the local meteoric water line equation in the study area are higher than are those of the global meteoric water line, indicating that the local recycled water vapor has a strong effect on high-altitude rivers. The relationship between $\delta^{18}O$ and δD in different precipitation types is obviously different. In summer, the evaporation fractionation of δD is greater than is that of $\delta^{18}O$, and both the slope and the intercept of the local meteoric water line are smaller. In winter, the evaporation fractionation of δD is obviously weakened, and the slope and intercept of the snowfall local meteoric water line are both larger; (3) There is an obvious temperature effect on the isotopes of precipitation in the Kashi River Basin. In summer, the temperature is high and the isotope are enriched. The annual precipitation effect is not significant, but there is a certain precipitation effect in autumn; (4) On the annual scale, there is a relatively large surplus of deuterium, indicating that it is affected greatly by the water vapor from the Atlantic Ocean and the local recycling water vapor. In seasonal terms, the precipitation comes from the Atlantic Ocean in summer and autumn, and the deuterium surplus is high, whereas the precipitation comes from the Arctic Ocean in winter and spring, and the deuterium surplus is low; (5) In summer and autumn the precipitation comes mainly from westerly circulation and local recycled water vapor. The precipitation formed by Atlantic water vapor accounts for 68.6% of the total annual precipitation, whereas the precipitation formed by local recycled water vapor accounts for 17.1%. In winter, the precipitation is affected by westerly circulation and the Arctic air mass, and the precipitation formed by Arctic water vapor accounts for 14.3% of the total annual precipitation.

Keywords: Kashi River Basin; precipitation; stable isotope; source of water vapor